

ESTADÍSTICA DEL SPECKLE DINÁMICO PRODUCIDO POR UN DIFUSOR ROTANTE Y SU RELACIÓN CON LA VELOCIDAD TANGENCIAL.

G. G. Romero^{*1} , E. E. Alanís

Facultad de Ciencias Exactas - Consejo de Investigación
Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177- 4400- Salta - Argentina
e-mail: marigra@ciunsa.edu.ar

H. J. Rabal

Centro de Investigaciones Ópticas - Universidad Nacional de La Plata
Casilla de Correos 124 - 1900 La Plata
e-mail: postmaster@ciunsa.edu.ar

Se describe un estudio experimental de la estadística de los patrones de speckle dinámico en el campo de Fresnel, producidos al iluminar con un haz láser un difusor que rota a velocidad angular constante. Se establece una correlación entre distintos parámetros medidos a partir de las funciones de autocorrelación y potencia espectral, de las fluctuaciones de intensidad de los patrones de speckle, con la velocidad tangencial correspondiente a distintas distancias del eje de rotación. Los parámetros introducidos se aplican para caracterizar la actividad de speckle producido por pintura en proceso de secado.

The statistics of dynamics speckle patterns produced by a moving diffuser is considered. A correlation is established between several characteristics parameters of the power spectral and autocorrelations functions and the velocity of the moving object. This parameters are used to characterise the speckle activity of paint in drying process.

I. INTRODUCCIÓN

La dispersión de la luz coherente cuando es reflejada o transmitida por un objeto difusor, tiene propiedades estrechamente vinculadas a las características de este último. De esta forma, la coherencia de la luz incidente transforma a la luz dispersada en portadora de información sobre aquello que originó la dispersión. Cuando en el objeto difusor ocurren fenómenos dinámicos, como en los tejidos vegetales, el flujo sanguíneo y las muestras biológicas en general, las pinturas en proceso de secado, etc., los patrones de speckle que se obtienen son también dinámicos, resultantes de múltiples dispersiones y por lo general fluctúan espacial y temporalmente de forma aleatoria de acuerdo con la estructura complicada y la actividad fisiológica de los objetos vivos. En los últimos años la medida de la actividad de los patrones de speckle dinámicos ha sido una constante preocupación dentro de la comunidad de ópticos. En este sentido se han reportado trabajos^(1,2,3) que proponen distintos parámetros tales como el FWHM (Full Width at Half Maximum) para caracterizar la función de autocorrelación de la historia temporal de un diagrama de speckle. En un trabajo reciente⁽⁴⁾, se ha encontrado que los parámetros WER (Width of the Equivalente Rectangle) y $X \cdot \log X$, que tienen en cuenta mayor cantidad de puntos de la función de autocorrelación permiten obtener buenos resultados para

la caracterización del speckle producido durante el proceso de secado de pinturas y secado de rodajas de frutas.

Es obvio que poder establecer una relación entre los parámetros que miden la actividad de un patrón de speckle y el fenómeno que lo produce, resulta de gran interés. En este trabajo se plantea el estudio de otros métodos para caracterizar la actividad de los patrones de speckle. Se investiga el comportamiento, por un lado de la transformada de Fourier de la señal correspondiente a las fluctuaciones de intensidad registradas por un fotomultiplicador, a fin de obtener información a partir de las frecuencias componentes de la misma. Por otro lado se investiga la función de autocorrelación de la señal introduciendo otros parámetros para caracterizarla, los que se comparan con los anteriormente mencionados. En este estudio se utiliza un sistema experimental simple consistente en un disco difusor que rota a velocidad constante. La elección de este dispositivo se debe a que se trata de un método sencillo para obtener speckle dinámico, pudiéndose variar fácilmente la velocidad iluminando zonas a distintas distancias r del centro, dada la relación $V = r \cdot \omega$, donde V es la velocidad tangencial y ω la velocidad angular, constante. El objetivo que se persigue, es encontrar una relación entre la actividad del speckle y la causa dinámica que lo produce, es decir, la velocidad tangencial del difusor. Esto se describe en la

¹ Bccaria del CONICET

primera parte del trabajo. Más adelante se aplica lo estudiado en este experimento, al caso del secado de pintura, donde el comportamiento del sistema no es tan sencillo por intervenir factores difíciles de controlar (evaporación del solvente, formación de capa, acción de la luz láser, etc.).

II. Experiencia del disco rotante

Toma de datos

El dispositivo utilizado se esquematiza en la figura 1. El disco difusor se adosa a un motor de bajas revoluciones y se ilumina con un haz láser a distintas distancias del centro

Las señales correspondientes a las fluctuaciones de intensidad del speckle se almacenan en computadora, mediante una placa de adquisición de datos, que digitaliza la información proveniente del detector. La frecuencia de muestreo se fijó en 1000 Hz y la cantidad de datos por registro fue de 1024. En cada punto de interés se registran varias señales a fin de encontrar valores promedios.

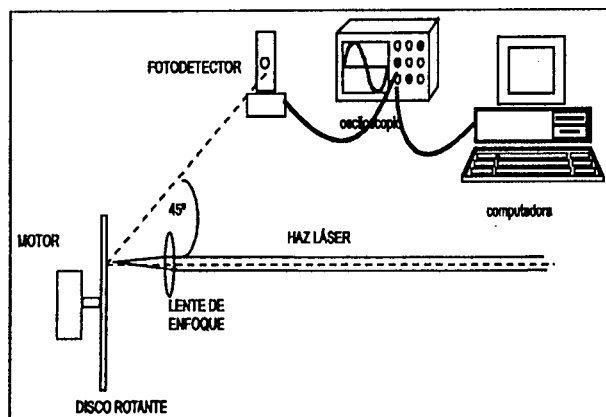


Figura 1: Dispositivo experimental

Procesamiento de datos

a) Transformada de Fourier

Se calcularon las transformadas de Fourier de cada uno de los archivos y se promediaron las correspondientes a cada radio obteniéndose transformadas promedio con el fin de minimizar el ruido⁽⁵⁾. Se observa que el ancho de banda de las señales aumenta a medida que aumenta la velocidad o sea a medida que nos alejamos del centro de rotación del disco. Este comportamiento se aprecia en la figura 2 donde se muestra una gráfica de las transformadas de Fourier promedio para tres de los radios evaluados. Para asignar una medida a la variación del ancho de banda de las transformadas se evaluaron las frecuencias medias de los espectros mediante la expresión

$$\bar{f} = \frac{\sum f_i F_i}{\sum F_i} \quad (1)$$

donde F_i es el módulo de la transformada de Fourier correspondiente a la frecuencia f_i .

La figura 3 muestra una gráfica de la frecuencia promedio del espectro en función del radio, observándose una dependencia lineal. Se muestra la recta de regresión calculada. Se concluye que este parámetro caracteriza la actividad del speckle dinámico por estar relacionado directamente con la velocidad del difusor a través de la relación $V = r \cdot \omega$.

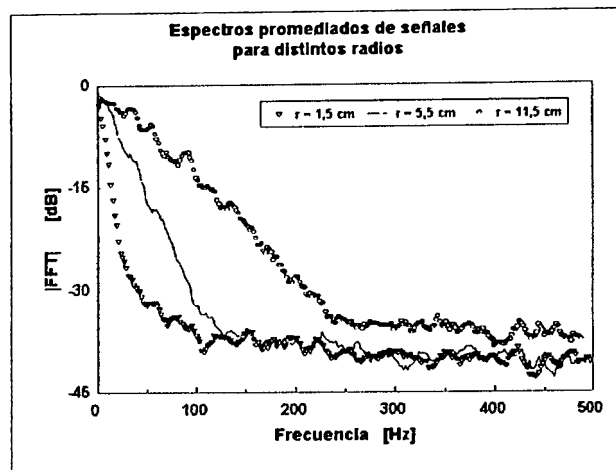


Figura 2: Transformadas de Fourier promedio.

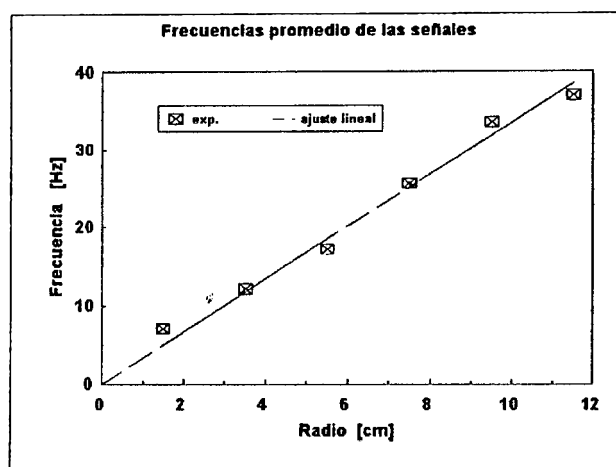


Figura 3: Dependencia de la frecuencia media del espectro con el radio.

b) Funciones de Autocorrelación

Las fluctuaciones de intensidad registradas por el detector, representan la historia temporal de los granos de speckle en un determinado punto del campo de Fresnel. Varios granos de speckle nacen y mueren durante el tiempo de registro y el número de ellos depende, naturalmente, de la duración tanto del registro como de cada grano en particular. Cuando se calcula la función de autocorrelación, los primeros puntos de la misma representan una especie de promedio de la correlación de cada grano con sí mismo, por lo que su forma funcional en ese período de tiempo estaría relacionada con la forma funcional del grano. A medida que se avanza en el cálculo, los granos se defasan progresivamente produciendo un mínimo relativo en la función de autocorrelación que luego crece nuevamente a medida que cada uno solapa con su vecino próximo. La

ubicación de este mínimo estaría relacionada con la vida media de los granos del speckle⁽⁶⁾, que a su vez caracterizaría el fenómeno dinámico. De acuerdo con esto, la caracterización del speckle vendría dada por el comportamiento de los primeros puntos de la función de autocorrelación.

El parámetro FWHM clásico en la literatura, mide el ancho de la función de autocorrelación a la mitad de la máxima altura por lo que, si bien tiene en cuenta toda la función, caracteriza el fenómeno con un solo valor de ella. El WER, o ancho del rectángulo equivalente, se calcula utilizando todos los valores de la función de autocorrelación, lo que permite reducir el ruido en la medida. Viene definido por:

$$\langle b \rangle = (1/N) \sum_{k=1}^N \frac{\tau_k}{1 - A(\tau_k)} \quad (2)$$

donde N es el número de puntos que se utilizan y $A(\tau_k)$ es el valor de la autocorrelación correspondiente al k -ésimo elemento.

Una ligera variante para caracterizar la actividad, utilizada aquí, es calcular el ancho del rectángulo equivalente con los primeros puntos de la función de autocorrelación, de acuerdo con la discusión planteada al comienzo. Por ejemplo, el WER30 se calcula haciendo $N=30$ en la ec.(2).

Considerar el WER equivale a suponer que la forma de los granos de speckle se puede aproximar a un rectángulo. Sin embargo la observación de las señales de las variaciones de intensidad sugieren que la forma funcional de la historia temporal del grano se podría aproximar por otros tipos de curvas de comportamiento más suave, como gaussianas, lorentzianas o exponenciales decrecientes. Estas funciones tienen la característica de que sus funciones de autocorrelación son curvas del mismo tipo. En el supuesto que la función sea una exponencial del tipo:

$$f(\tau) = f_0 \exp\left\{-\frac{|\tau|}{\tau_0}\right\} \quad (3)$$

donde τ_0 es la constante de tiempo, se puede definir el ancho de la exponencial equivalente, WEX, con la misma filosofía que el WER, de la forma:

$$\langle a \rangle = (1/N) \sum_{n=1}^N \frac{-\ln A(\tau_n)}{|\tau_n|} \quad (4)$$

donde $a = 1/\tau_0$ y \ln significa logaritmo natural. Para verificar estas cuestiones se calcularon las funciones de autocorrelación normalizadas, $A(\tau)$, correspondientes a las fluctuaciones de intensidad registradas a varias distancias r del centro de rotación. La figura 4 muestra los primeros 30 puntos de las funciones de autocorrelación promedio, para cada posición r . Se puede observar que la forma de estas curvas se modifica a medida que r disminuye, tendiendo a una función triángulo para $r \rightarrow 0$ (actividad nula). Se calcularon los parámetros definidos anteriormente para cada una de las

funciones mostradas en la figura 4. En la figura 5 se muestran estos parámetros los que a fin de poder compararlos en una misma escala se normalizan dividiendo cada serie por el valor máximo correspondiente. Es notable que los parámetros WER y FWHM, que consideran la función de autocorrelación completa resultan poco sensibles a las variaciones de r , mientras que WER30 y WEX presentan una dependencia con r mucho más marcada, es decir, reflejan las variaciones de la velocidad del difusor, lo que concuerda con la idea de caracterizar el fenómeno con los primeros puntos de la autocorrelación. Sin embargo no se observa una dependencia lineal con el radio, como en el caso de las frecuencias medias.

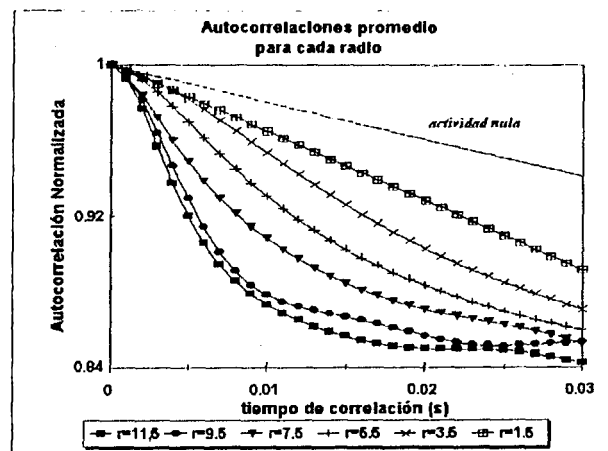


Figura 4: Funciones de autocorrelación promedio para distintas distancias, r , del centro.

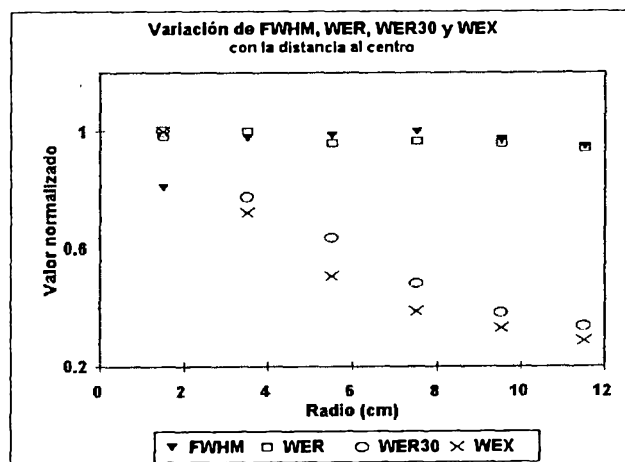


Figura 5: Gráfico comparativo de los parámetros normalizados.

c) Ajuste con funciones gaussianas y lorentzianas.

Observando la figura 4, se ve que esa zona de las curvas de autocorrelación parecen aproximarse a funciones gaussianas o lorentzianas. Es así que, como una nueva forma de caracterizar las funciones de autocorrelación, se

planteó ajustar dichas curvas por medio de estas funciones y utilizar su ancho característico como una medida de la actividad del speckle. Para hacer el ajuste hay que tener en cuenta que el tiempo de vida media del speckle es distinto para cada radio pues depende de la velocidad del difusor que como vimos, está directamente relacionada con la frecuencia media del espectro de la señal. Si en la figura cuatro se modifica la escala de tiempo para cada una de las curvas mostradas, multiplicándolas por un factor adecuado, se logra una coincidencia notable de todas ellas en un cierto intervalo $(0, \tau)$, más allá del cual comienzan a diferir. El factor apropiado es la relación de las correspondientes frecuencias, calculadas con la ec. (1). En el intervalo de coincidencia mencionado se realiza el ajuste de cada función de autocorrelación con una gaussiana y una lorentziana, respectivamente, dadas por las expresiones siguientes:

$$G(\tau) = G_0 \exp \{-\sigma \tau^2\} \quad (5)$$

$$L(\tau) = L_0 \{ \gamma^2 / (\tau^2 - \gamma^2) \} \quad (6)$$

En la gráfica siguiente, figura 6, se muestran los resultados del ajuste realizado a las funciones de la figura 4, donde se observa la relación inversa entre los anchos σ y γ y el radio. Esta relación recíproca es la esperada por cuanto a mayor velocidad, la función de autocorrelación cae más rápidamente, es decir, el tiempo de correlación disminuye y por lo tanto el ancho de la curva es menor. Las rectas de ajuste lineal muestran un mejor comportamiento para la aproximación gaussiana.

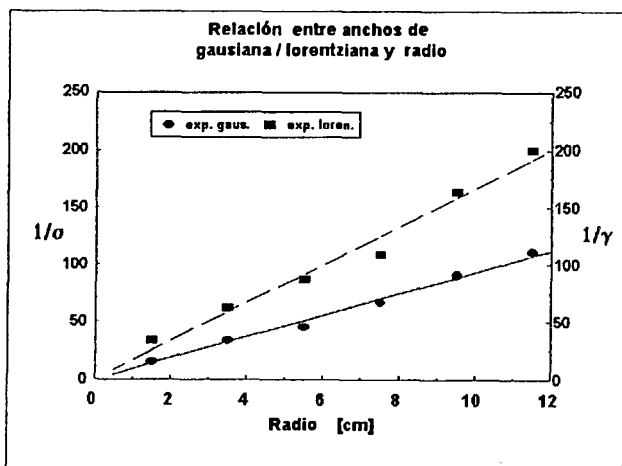


Figura 6: Ancho de las gaussianas y lorentzianas que mejor ajustan las curvas de la figura 4, junto con las rectas de correlación

III Aplicación al estudio de secado de pintura.

El dispositivo experimental es similar al de la figura 1, donde en lugar del disco rotante se coloca una superficie plana pintada con esmalte sintético blanco, con las modificaciones necesarias para ubicar la superficie horizontalmente y evitar el escurrimiento. La toma de datos y el procesamiento de señales es idéntico al descrito anteriormente. Lo que se estudia en este caso es la evolución temporal de los patrones de speckle, cuya

actividad reflejará los cambios que se produzcan a medida que la pintura se seca.

a) Transformada de Fourier.

En la figura 7 se muestra las transformadas de Fourier de algunas señales correspondientes a distintos tiempos de secado. Aunque de manera no tan monótona como en el caso del disco, se observa una compresión en el ancho de banda a medida que el tiempo progresa y la actividad disminuye.

En la figura 8, se grafica la frecuencia media de los espectros, en función del tiempo de secado, calculadas con la ec.(1). Aquí se aprecia claramente que el decrecimiento de la frecuencia no es estrictamente monótono.

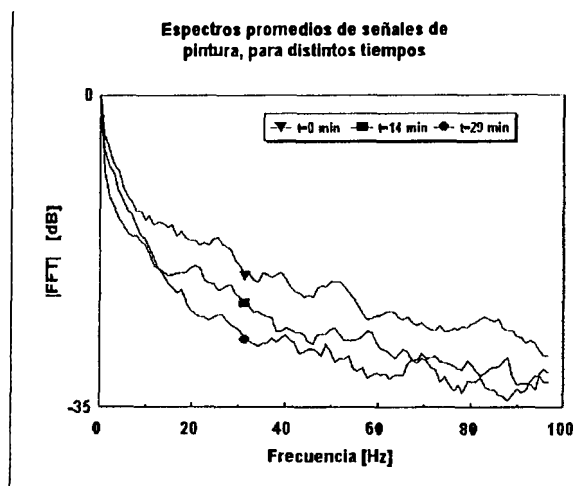


Figura 7 Transformadas de Fourier promedio. Secado de pintura

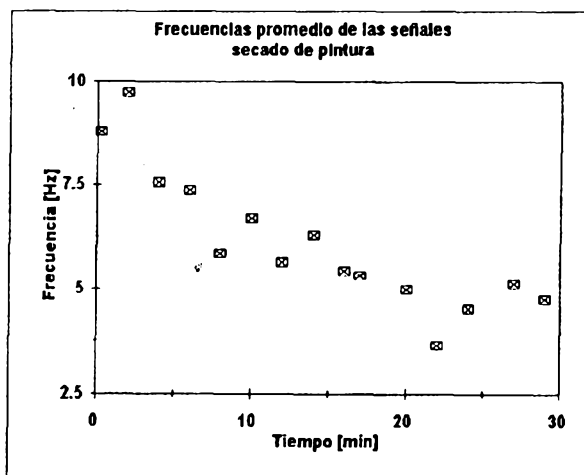


Figura 8. Dependencia de la frecuencia media del espectro con el tiempo de secado.

b) Función de autocorrelación.

Los primeros puntos de algunas funciones de autocorrelación, correspondientes a distintos tiempos, se muestran en la figura 9.

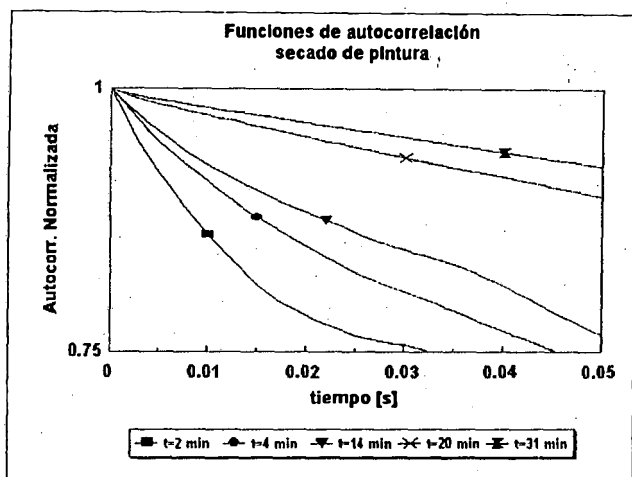


Figura 9 Funciones de autocorrelación promedio para cada tiempo.

La tendencia general es la que se observa en la figura, pero el comportamiento no es tan regular si se consideran todas las funciones. Los parámetros WER30 y WEX, revelan este comportamiento irregular.

La forma de las curvas de la figura 9 sugieren un comportamiento exponencial. Efectivamente, esta función da un ajuste mucho mejor que una gaussiana o lorentziana. Siguiendo un procedimiento similar al empleado en la experiencia del disco, se realizó un ajuste exponencial de cada curva con la función de la ec.(3), para medir la actividad del speckle por medio del tiempo de amortiguamiento de la función de autocorrelación. En la figura 11 se grafica la constante de tiempo τ_0 , obtenida de tal ajuste, en función del tiempo de secado.

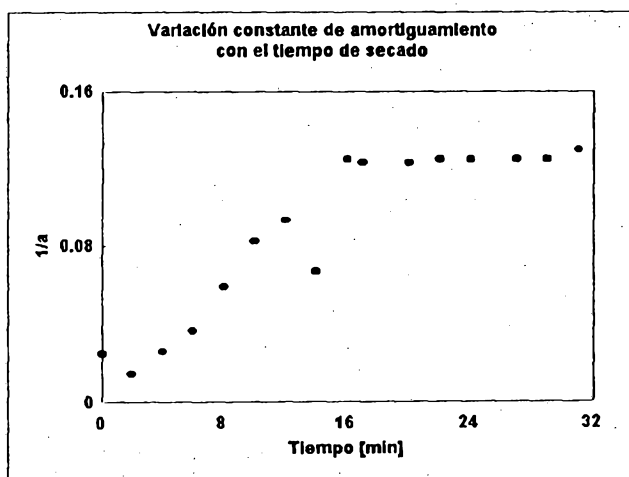


Figura 10: Constante de tiempo de las exponenciales que mejor ajustan las curvas de autocorrelación, para distintos tiempos de secado.

Conclusiones

Este trabajo plantea el uso de los primeros puntos de la función de autocorrelación, para caracterizar la actividad de patrones de speckle dinámico. Los resultados experimentales muestran que los parámetros definidos con este criterio dan una buena correlación con la velocidad, en el caso del disco difusor rotante, en cuyo caso es el ancho de la gaussiana que ajusta los primeros puntos, la que tiene mejor comportamiento.

En el caso del secado de pintura, el proceso no es tan regular o predecible como en el caso del difusor, por lo que se observan fluctuaciones en todos los parámetros medidos. En este caso, las curvas de autocorrelación son mejor ajustadas por medio de funciones exponenciales decrecientes, siendo la constante de tiempo de las mismas el parámetro que presenta el comportamiento más regular en función del tiempo de secado.

Agradecimientos.

Este trabajo ha sido financiado por el Consejo de Investigación (proyecto N° 402) y la Facultad de Ciencias Exactas de la U.N.Sa.

Referencias

1. - Aizu, Y and Asakura, T. Optics and Laser Technology, 23, 205-219, (1991).
2. - Briers, J. D. Journal of Experimental Botany. 29 N° 109 393-399, (1978).
3. - Alanís, E., Romero, G., Martínez, C., Rabal, J. Anales AFA 5, 56-, (1994).
4. - Rabal, H., Trivi, M., Arizaga, R., Romero, G. y Alanís, E. Optical Engineering, 35 N° 1, 57-62, (1996).
5. - Pomarico, J., Arizaga, R., Torroba, R., Rabal, J. Optik, N° 3, 125-127, (1993).
6. - Henao, R., Pomarico, J., Russo, N., Torroba, R., Trivi, M. Optical Engineering, 35 N°1, 26-30, (1996).

CEILAP
CITEFA - CONICET
ZUFRIATEGUI Y VARELA
1603 VILLA MARTELLI
REPUBLICA ARGENTINA